

EMISSÃO VEICULAR E O OZÔNIO TROPOSFÉRICO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE, MINAS GERAIS, BRASIL

Elisete Gomides Dutra¹, Edwan Fernandes Fioravante¹, Flávio Daniel Ferreira¹

¹ Fundação Estadual do Meio Ambiente, Rua Espírito Santo N° 485, Centro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. *elisete.gomides@meioambiente.mg.gov.br

Área Temática: Aspectos ambientais

RESUMO

Desde a revolução industrial, a poluição atmosférica vem sendo agravada pela utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia. No processo de refino, armazenagem e consumo (queima) desses combustíveis, são gerados gases precursores do ozônio, ou seja, compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio, que por sua vez com a incidência de radiação solar, sofre reação química formando ozônio. O presente artigo tem o objetivo de avaliar a influência dos veículos automotores no aumento das concentrações de ozônio mediante determinação da correlação temporal da incidência máxima de radiação solar e temperatura, com as máximas concentrações de ozônio. Para avaliar a influência dos veículos automotores, foram analisadas as medições realizadas no ano de 2008, de duas estações da rede de monitoramento da qualidade do ar da Região Metropolitana de Belo Horizonte gerenciada pela Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais, Brasil. Estação Praça Rui Barbosa, localizada no centro urbano de Belo Horizonte, sobre influência de poluição veicular, e estação Bairro Petrovale, em Betim, sobre influência de poluição veicular, de uma refinaria de petróleo, de envasadoras de gás e termelétrica. Os dados de uma terceira estação localizada no município de Vespasiano foram também analisados para relacionar a máxima incidência de radiação solar com a máxima de temperatura do dia. Para tal, a hora de ocorrência da média máxima de concentração de ozônio foi subtraída da hora de ocorrência da temperatura máxima. A utilização do parâmetro meteorológico temperatura como proxy para radiação solar demonstrou ser válida, uma vez que os horários de ocorrência das temperaturas máximas tendem a estar próximos dos horários de ocorrência das concentrações máximas de ozônio. Assim, o estudo indica que o ozônio troposférico medido nessas regiões deve-se à existência de gases precursores gerados nas mesmas, e não de gases transportados de outras regiões.

PALAVRAS CHAVES: Qualidade do Ar, Ozônio, Emissão Veicular, Radiação solar, Temperatura.

INTRODUÇÃO

Após a revolução industrial, no fim do século XVIII, e com maior intensidade no século XX, os impactos causados pela ação antrópica no meio ambiente tornaram-se mais significativos, em conformidade ao crescimento populacional e também ao consumismo pessoal, principalmente nos países desenvolvidos. Dentre esses impactos, destacam-se aqueles relacionados à degradação do meio ambiente, em caráter mundial, devido à emissão de poluentes atmosféricos.

Os maiores responsáveis por estas emissões estão diretamente relacionados à geração de energia, produção industrial e frota de veículos nos centros urbanos. Essas atividades são emissoras de gases precursores do ozônio (O₃), ou seja, de compostos orgânicos voláteis (COV) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

O ozônio troposférico, presente nas camadas mais baixas da atmosfera, é um poluente secundário, pois não é emitido diretamente para a atmosfera. É produzido mediante reações químicas entre NO_x e COV em dias ensolarados com altos índices de radiação solar, principalmente em áreas urbanas, industriais e em regiões propensas à estagnação de massas de ar. Ozônio em altas concentrações é um problema de saúde pública [1]. De acordo com Pereira [2], o O₃ é um gás tóxico que provoca efeitos negativos na saúde humana como tosse, dor de cabeça, náuseas, dores peitorais e falta de ar. Para concentrações superiores a 360 µg/m³, durante uma hora podem verificar-se danos na função pulmonar.

Os veículos automotores são grandes responsáveis pela emissão de compostos orgânicos voláteis, óxidos de nitrogênio e, conseqüentemente, pela formação do ozônio em áreas urbanas. Acrescente-se a estas as perdas de combustíveis durante reabastecimento dos veículos e dos reservatórios dos postos de abastecimento, bem como as emissões específicas de alguns empreendimentos como refinaria de petróleo, envasadoras de gás e outras.

Para identificação dos poluentes presentes na atmosfera, a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM) gerencia a rede de monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) desde 1995. A rede é constituída por nove estações automáticas que medem os poluentes atmosféricos regulamentados pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) N° 3 de 1990 que são material particulado com granulometria inferior a 10 micrometros (MP_{10}), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3) e óxidos de nitrogênio (NO_x) durante 24 horas por dia, 365 dias por ano.

As estações são constituídas por cabines climatizadas onde estão instalados analisadores e sensores que realizam a amostragem do ar atmosférico, e determinam a concentração de poluentes e dados meteorológicos de forma contínua. Os resultados são transmitidos em tempo real para a central de aquisição de dados instalada na sede da FEAM.

A análise da série histórica de dados de monitoramento da qualidade do ar da RMBH indica a tendência de aumento das concentrações de ozônio no período de agosto a outubro que corresponde ao final do inverno, época que apresenta pouca cobertura de nuvens. Verificou-se que a concentração de ozônio, assim como o número de dias com ultrapassagens do limite máximo estabelecido pela legislação nacional, tem aumentado significativamente nos últimos anos [3]. Como esse aumento ocorreu ao mesmo tempo em todas as regiões monitoradas, acredita-se que tenha sido causado pelo aumento dos veículos automotores em circulação.

Para avaliar a influência dos veículos automotores no aumento das concentrações de ozônio, foram analisadas as medições realizadas no ano de 2008, em duas estações de monitoramento com características distintas: a estação Praça Rui Barbosa localizada no centro urbano de Belo Horizonte, em área cuja poluição é basicamente de origem veicular; a estação Bairro Petrovale, cuja região está sobre influência da poluição gerada por veículos, além de uma refinaria, envasadoras de gás, uma termelétrica e outros. Essas estações não possuem analisador de radiação solar, portanto, o horário de ocorrência da concentração máxima de ozônio foi comparado com o horário de ocorrência da temperatura máxima de cada dia. Partindo da premissa, que uma maior concordância entre os horários de ocorrência das máximas de ozônio e de temperatura indicam que o ozônio está sendo formado próximo ao local de medição, pode-se concluir, que os gases precursores do ozônio são emitidos na região, principalmente, os compostos orgânicos voláteis.

Uma segunda análise foi feita para avaliar a utilização do parâmetro meteorológico temperatura como uma *proxy* para a radiação solar. Nesse sentido, foram comparados os horários de ocorrência das máximas concentrações de ozônio, temperatura e radiação solar, no período de janeiro a abril de 2009, no município de Vespasiano. Não há uma série completa de medições para 2008, porque o projeto de pesquisa desenvolvido pela FEAM para avaliação da qualidade do ar no referido município teve início no final desse ano. Esse município apresenta características intermediárias quanto às fontes emissoras quando comparadas ao município de Betim, que são principalmente industriais, e ao município de Belo Horizonte, essencialmente veicular.

Em suma, tendo em vista o aumento significativo no número de veículos leves na frota da RMBH nos últimos anos, este artigo propõe correlacionar os valores máximos diários de ozônio, radiação solar e temperatura em três regiões com características distintas de fontes emissoras, com intuito de avaliar a influência dessas características nas concentrações de ozônio registradas em cada região. Essas informações poderão ser utilizadas para o planejamento de ações de caráter preventivo ou corretivo.

METODOLOGIA

Para avaliar a associação entre os horários de ocorrência da máxima concentração de ozônio e da temperatura máxima foi utilizada a metodologia apresentada por Fioravante [4], que foi utilizada para regiões com características industriais [5].

A Resolução CONAMA N° 03 de 1990 estabelece como método de análise para determinação da concentração de ozônio o Método da Quimioluminescência ou método equivalente [6]. O equipamento utilizado na rede de monitoramento da RMBH (denominado O341M pelo fabricante francês) é um analisador contínuo específico para pequenas concentrações, que usa o princípio de detecção da absorção da luz ultravioleta pelo ozônio. O intervalo de medição é programável até um máximo de 10.000 ppm e o limite mínimo de detecção é de 0,001 ppm para um tempo de resposta de 50 segundos [7].

As medições realizadas são transmitidas para a FEAM onde as médias dos dados de quinze minutos são registradas e utilizadas para cálculo das médias horárias. O critério de representatividade utilizado é de 75% de dados válidos, ou seja, são necessárias pelo menos três médias de quinze minutos para validar o cálculo de cada média horária.

Para a identificação da maior média horária de cada dia, o critério de 75% também é utilizado. Isso quer dizer que são necessárias pelo menos dezoito médias horárias válidas, dentre as vinte quatro médias horárias de um determinado dia, para validar a máxima média horária do dia. Para análise neste trabalho foram considerados os dados obtidos em 2008, para as estações Praça Rui Barbosa e Bairro Petrovale, e os dados obtidos de janeiro a abril de 2009 para a estação móvel, em Vespasiano.

Seguindo esse critério, foram anotadas a hora de ocorrência da máxima média horária das concentrações de ozônio e a hora de ocorrência da temperatura máxima para cada dia. A diferença entre os horários de ocorrência desses máximos foi calculada da seguinte forma: a hora de ocorrência da média máxima de ozônio foi subtraída da hora de ocorrência da temperatura máxima. Por exemplo, uma diferença igual a "+1" significa que a concentração máxima do ozônio ocorreu uma hora depois do horário de ocorrência da temperatura máxima; enquanto que uma diferença igual "-1" significa que a concentração máxima de ozônio ocorreu uma hora antes do horário de ocorrência da temperatura máxima do respectivo dia. A equação a seguir apresenta o cálculo dessa diferença para cada dia "i" do ano de 2008:

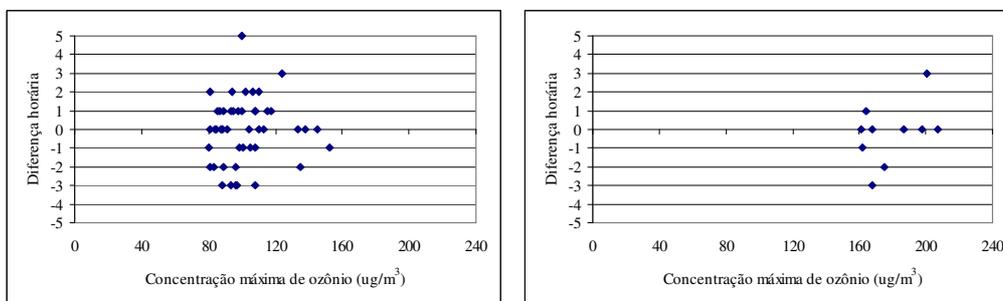
$$Diferença_i = Horário_{Concentração\ máxima\ de\ Ozônio_i} - Horário_{Temperatura\ Máxima_i} \quad (1)$$

Para avaliar o parâmetro meteorológico temperatura como uma *proxy* para radiação solar, foi utilizada a diferença entre os horários de ocorrência da concentração máxima de ozônio e de radiação solar máxima, ambas registradas na estação de monitoramento do município de Vespasiano, para o período de janeiro a abril de 2009.

RESULTADOS

Em 2008, a estação Praça Rui Barbosa, em Belo Horizonte, registrou quarenta e nove dias com concentrações de ozônio maiores que 80 microgramas por metro cúbico de ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). De acordo com a Resolução CONAMA N° 03 de 1990, essa concentração classifica a qualidade do ar como regular; não havendo ultrapassagem do padrão primário de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Entretanto, a estação Bairro Petrovale, em Betim, que está sob influência da emissão de poluentes precursores de ozônio, não só de origem veicular como também de origem industrial, apresentou dez dias com ultrapassagens desse padrão, o que classifica a qualidade do ar como inadequada.

A diferença de nível entre as concentrações de ozônio em Belo Horizonte e Betim reflete a diferença entre as características das regiões onde estão instaladas as estações de monitoramento, uma vez que, não se verifica grandes diferenças entre os parâmetros meteorológicos dessas duas estações. A (fig. 1) apresenta a distribuição dessas concentrações em função da diferença entre o horário de ocorrência da concentração máxima de ozônio e do horário de ocorrência da temperatura máxima de cada dia, conforme apresentada na Eq. (1).



a) Estação Praça Rui Barbosa, Belo Horizonte

b) Estação Bairro Petrovale, Betim

Fig. 1: Diferenças horárias entre temperaturas máximas e concentrações máximas de ozônio nas estações de monitoramento de Belo Horizonte (maiores que $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e Betim (maiores que $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2008

As concentrações máximas de ozônio registradas na estação Praça Rui Barbosa, em Belo Horizonte, foram maiores que $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em quarenta e nove dias, em 2008. Em treze desses dias a máxima concentração de ozônio ocorreu no mesmo horário da temperatura máxima, ou seja, diferença igual a zero. Em Betim, as concentrações máximas de ozônio registradas na estação Bairro Petrovale foram maiores que $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante dez dias, sendo que em cinco desses também ocorreram no mesmo horário da temperatura máxima.

De um modo geral, a diferença horária aproxima-se de zero quando a concentração máxima de ozônio aumenta. Dentre as concentrações máximas registradas pela estação Praça Rui Barbosa, 61,2% ocorreram entre uma hora antes (diferença igual a -1) e uma hora após (diferença igual a +1), em relação ao horário de ocorrência da temperatura máxima. Esses resultados estão em consonância com os apresentados por Fioravante [5]. Assumindo que a temperatura máxima ocorre no mesmo horário da radiação máxima, ou algumas horas após, pode-se dizer que há indício de que, em ambas as regiões, os precursores do ozônio estão presentes nessas regiões, pois a radiação solar favorece a transformação do dióxido de nitrogênio em óxido de nitrogênio e oxigênio, que por sua vez, reagirá com o oxigênio da atmosfera (O_2), formando, assim, o ozônio (O_3), conforme apontado por Melo [8].

Caso as concentrações máximas de ozônio tivessem vindo de regiões distantes das estações Praça Rui Barbosa e Bairro Petrovale, as diferenças horárias deveriam ser, em módulo, maiores do que as que foram observadas, ou seja, deveriam ter ocorrido muito antes do registro de temperatura máxima, em 2008.

A (fig. 2) apresenta o gráfico de dispersão das medições dos parâmetros temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar registradas pela estação situada no município de Vespasiano, no período de janeiro a abril de 2009, para avaliar a adequação do parâmetro temperatura como *proxy* para radiação solar. Nesse período, a temperatura variou de 13°C a 40°C , cuja série temporal apresentou média igual a $24,6^{\circ}\text{C}$, com desvio padrão de $5,29^{\circ}\text{C}$. A radiação solar variou de 0 a $1.024 \text{ W}/\text{m}^2$, cuja média correspondeu a $181,5 \text{ W}/\text{m}^2$, com desvio padrão de $259,27 \text{ W}/\text{m}^2$.

Ao traçar os eixos que passam pela temperatura média de $24,6^{\circ}\text{C}$ e radiação solar média igual a $181,5 \text{ W}/\text{m}^2$, observa-se que grande parte dos pontos apresenta uma concordância entre esses dois parâmetros, o que era esperado. Isso quer dizer que, há uma probabilidade maior de que a temperatura horária esteja acima da média, se a radiação solar, naquele horário, esteja também acima da média. O raciocínio contrário também é válido; há uma probabilidade maior de que a temperatura horária esteja abaixo da média, se a radiação solar, naquele horário, também esteja abaixo da média. O coeficiente de correlação de Pearson, que mede a intensidade da relação entre dois parâmetros quaisquer, correspondeu a 0,77 entre a temperatura e a radiação solar.

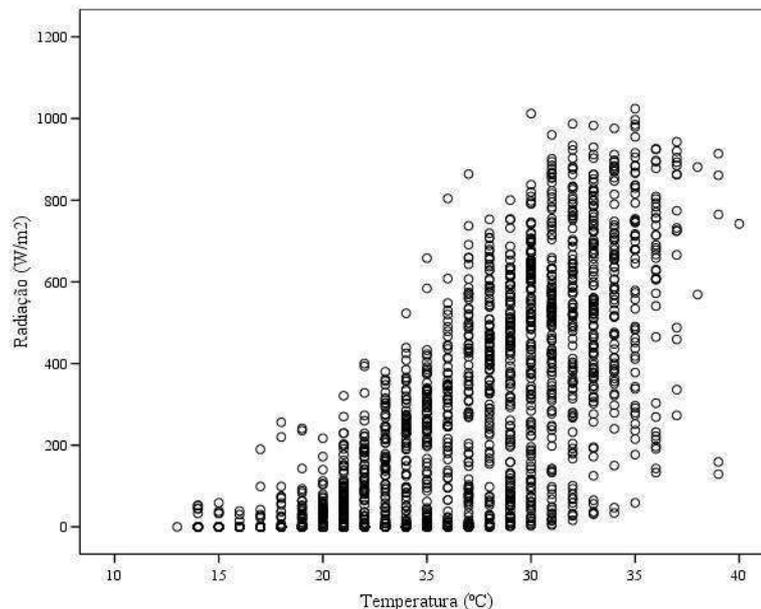
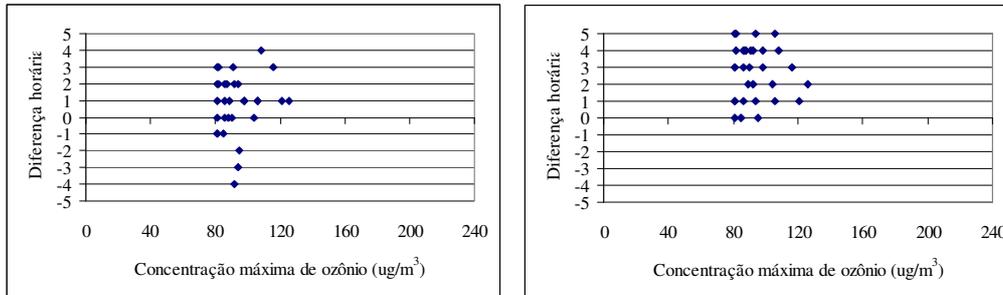


Fig. 2: Gráfico de dispersão das medições horárias de radiação solar (W/m^2) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$) registradas pela estação de Vespasiano, janeiro a abril de 2009

A fig. 3 apresenta a distribuição da diferença entre o horário de ocorrência da temperatura máxima e da concentração máxima de ozônio registradas pela estação de Vespasiano, bem como a distribuição da diferença entre o horário de ocorrência da radiação solar máxima e da concentração máxima de ozônio. O cálculo da diferença entre o horário de ocorrência da radiação solar máxima e o horário de ocorrência da concentração máxima de ozônio foi realizado de forma similar ao apresentado na Eq. (1), para temperatura máxima e ozônio.



a) Temperatura máxima

b) Radiação solar máxima

Fig.3: Distribuição das concentrações diárias máximas de ozônio registradas, em função das diferenças horárias de ocorrência da temperatura máxima e da radiação máxima, Vespasiano, janeiro a abril de 2009

Dentre os trinta e um dias, cujas concentrações máximas de ozônio foram superiores a $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nove delas ocorreram no mesmo horário de ocorrência da temperatura máxima; ao passo que três delas ocorreram no mesmo horário de ocorrência da radiação solar máxima. Ao utilizar a radiação solar para o cálculo da diferença horária, percebe-se que todas elas são positivas, indicando, assim, que a concentração máxima de ozônio sempre ocorre após a ocorrência de radiação solar máxima. Essa é uma vantagem, quando se pensa que há um maior tempo para prever o aumento da ocorrência de concentrações máximas de ozônio. Entretanto, pode-se considerar como viável a utilização do parâmetro temperatura como *proxy* para radiação solar, pois são poucas as diferenças negativas calculadas em função da temperatura máxima.

As diferenças calculadas em função da temperatura máxima são menores ou iguais às diferenças calculadas em função da radiação solar máxima. Portanto, uma vez que radiação solar favorece a formação do ozônio e ocorre antes do horário de ocorrência de temperatura máxima, pode-se concluir que, as concentrações de ozônio registradas em Belo Horizonte e Betim, devem-se à presença de gases precursores do mesmo, nas respectivas regiões.

CONCLUSÃO

A utilização do parâmetro meteorológico temperatura como *proxy* para radiação solar demonstrou ser válida, uma vez que os horários de ocorrência das temperaturas máximas tendem a estar mais próximos dos horários de ocorrência das concentrações máximas de ozônio do que os horários de ocorrência da radiação solar máxima do dia.

As diferenças calculadas entre os horários de ocorrência das concentrações máximas de ozônio e os horários de ocorrência das temperaturas máximas, com base nas medições realizadas pelas estações Praça Rui Barbosa, em Belo Horizonte, e Bairro Petrovale, em Betim, em 2008, indicam que é mais plausível concluir que o ozônio presente nessas regiões está sendo formado nas mesmas e não transportado de outra região.

Em 2009, na região de Petrovale, o limite máximo de concentração de ozônio determinado pela Resolução CONAMA Nº 3 de 1990 que é de **160 microgramas por metro cúbico de ar** foi ultrapassado 1 dia em janeiro, 2 dias em fevereiro, 11 dias em março, 10 dias em abril e 5 dias em maio. Os valores mais altos ocorreram em 8 de maio ($274,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 3 de março ($273,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e 25 de fevereiro ($260,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). No dia 3 de março foram registradas 9 horas seguidas de ultrapassagem do Padrão de Qualidade do Ar.

Entre 2005 e 2008, a proporção de dias cuja qualidade do ar foi classificada como regular devido às concentrações de ozônio registradas na estação Praça Rui Barbosa, em Belo Horizonte, aumentou de 4,4% para

13,4%. Na estação Bairro Petrovale, em Betim, observou-se que a proporção de dias com qualidade inadequada aumentou de 1,1% para 2,7%, no mesmo período.

O aumento do nível das concentrações de ozônio pode ser atribuído, de modo geral, ao aumento da frota de veículos, principalmente, no município de Belo Horizonte. Entretanto, acredita-se que esse aumento seria ainda maior caso não tivesse havido no mesmo período uma melhoria na tecnologia dos motores automotivos.

O inventário de emissão de hidrocarbonetos, para veículos leves, entre 2000 e 2007, [9] apontou uma redução na emissão desse poluente da ordem de 22% para os veículos leves de Belo Horizonte, o que é um indicativo de que os aumentos nas concentrações de ozônio foram decorrentes do aumento do fluxo de veículos, e não por motivo do aumento de emissão dos mesmos.

O controle das emissões de óxidos de nitrogênio e de compostos orgânicos voláteis é a estratégia mais eficaz para reduzir níveis de ozônio na maioria dos centros urbanos. Com essa finalidade, têm-se como alternativas: reduzir as emissões de gases poluentes pelo escapamento dos veículos e reduzir as emissões pontuais e difusas de fontes fixas como refinarias de petróleo e envasadoras de gás, á exemplo da região de Petrovale, em Betim.

Com relação á redução das emissões de poluentes pelos veículos são necessários maiores investimentos na melhoria da qualidade dos combustíveis, especialmente do óleo diesel que, no Brasil, ainda é comercializado com teores de enxofre relativamente altos; bem como a implantação de programas de inspeção periódica de veículos. Sabe-se que parcela significativa de hidrocarbonetos emitidos pela frota veicular pode ser atribuída a um número relativamente pequeno de veículos cujos sistemas de controle da emissão não estão funcionando corretamente.

REFERÊNCIAS

1. ZAVATINI, J.A. **A dinâmica atmosférica e a distribuição das chuvas no Mato Grosso do Sul**. 27f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciência Humanas, Universidade de São Paulo, 1990.
2. PEREIRA, A.P. **O que deve saber sobre ozono**. Agência portuguesa do ambiente. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional: set. 1999. Disponível em <<http://www.apambiente.pt/divulgacao/Publicacoes/outrossuportes/Documents/ozono.pdf>>. Acesso em: 30 abr 2009.
3. FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Avaliação das concentrações de ozônio na Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Belo Horizonte: FEAM, 2009.
4. FIORAVANTE, E.F.; BRESCIA, C.A.; LIU, B.W.Y. Ocorrências de concentrações máximas de ozônio e temperatura no município de Belo Horizonte/MG. In: Congresso Interamericano de Qualidade do Ar, 3.. 2003, Canoas, **Anais...**Rio de Janeiro: ABES, 2003. 1 CD-ROM.
5. FIORAVANTE, E.F., CÉZAR JÚNIOR, A. **Análise das ocorrências de concentrações máximas de ozônio na Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Belo Horizonte: FEAM, 2006.
6. FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Monitoramento da Qualidade do ar na Região Metropolitana de Belo Horizonte; período de 1999 a 2000**. Belo Horizonte: FEAM, 2001.
7. ENVIRONNEMENT. **Technical manual: O341M – LCD**. Poissy: Environnement, 2000. 90p.
8. MELO, G.C.B. **Efluentes atmosféricos e qualidade do ar**. Apostila (Curso de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Belo Horizonte: UFMG, 1998.
9. FIORAVANTE, E.F.; FIGOLI, M.G.B. **Environmental impact due to automobile use**. In: INTERNATIONAL POPULATION CONFERENCE, 26., 2009, Marrakech, Morocos. Paris: IUSSP 2009.

NOMENCLATURA

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Microgramas por metro cúbico
<i>d</i>	Diferença



9º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica
[Las Palmas de Gran Canaria 2009]



i	Día do ano
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
W/m^2	Watts por metro cuadrado